

〈特集〉

下水処理プロセスにおける計測データを活用した曝気量制御技術の高度化

吉田 航¹⁾, 木本 勲²⁾, 今村 英二³⁾

¹⁾三菱電機(株) 先端技術総合研究所
(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 E-mail: Yoshida.Wataru@ak.MitsubishiElectric.co.jp)

²⁾三菱電機(株) 先端技術総合研究所
(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 E-mail: Kimoto.Isao@dc.MitsubishiElectric.co.jp)

³⁾三菱電機(株) 先端技術総合研究所
(〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1 E-mail: Imamura.Eiji@dy.MitsubishiElectric.co.jp)

概要

下水処理場では、多様な微生物を含む活性汚泥により汚濁物質を除去している。有機物やアンモニア態窒素の処理では活性汚泥に対して送風機により空気を供給（曝気）して反応槽内を好気条件とする。従来は反応槽内の溶存酸素濃度を一定に維持するよう曝気量が制御されてきた。近年では、計測技術とAI技術の発展により、省エネと処理水質の向上を両立する高度な曝気量制御が開発されている。本稿では、当社開発技術を事例として計測技術の発達により生まれた下水処理プロセス向けの新たな曝気量制御技術について紹介する。

キーワード：下水処理，曝気，AI，アンモニア，窒素除去

原稿受付 2024.5.9

EICA: 29(1) 18-22

1. はじめに

1.1 下水道について

SDGs (Sustainable Development Goals) の17の目標の6つ目に「安全な水とトイレを世界中に」が掲げられているように、持続可能な社会の実現に向けて水質保全に関する関心が一層高まっている。下水処理場は都市部の水質保全において重要な役割を果たしており、下水道管渠から流入する下水を浄化して河川や海域に放流する。下水に含まれる窒素、りんなどの栄養塩類は、海や河川に放流されると富栄養化の要因になりうることから、下水処理場では微生物を利用してこれらを除去している。

Fig. 1 に下水処理場の消費電力を示す。下水道事業は下水の処理に70億kWhという大量の電力を消費しており、これは168万世帯の年間電力使用量に相当する¹⁾。この消費電力の約半分は下水処理場の水処理

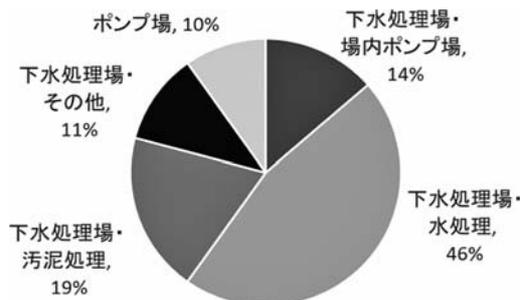


Fig. 1 The power consumption of sewage treatment plants (2017)¹⁾

施設によるもので、水処理施設で最も多く電力を消費するのが送風機である。

一般に、処理水質と消費電力はトレードオフの関係にあり、処理水質を改善すると消費電力が増加する傾向があると言われている。

1.2 下水処理場の生物処理

除去対象の物質によって下水処理場の構成は異なる。ここでは有機物および窒素除去を目的とした循環式硝化脱窒法について説明する。代表的な処理フローをFig. 2に示す。下水処理場に到達した下水はまず、沈砂池、及び最初沈殿池において沈降速度の大きな固形物が沈殿し、水中から取り除かれる。最初沈殿池を通過した下水は反応槽において多様な微生物を含む活性汚泥と混合される。循環式硝化脱窒法では反応槽は無酸素槽と好気槽で構成され、下水は無酸素槽を先に通過するが、説明の容易化のためまず好気槽について言及する。好気槽では送風機から曝気されるため槽内は好気状態になる。これにより、有機物の分解とアンモニア態窒素の硝酸への酸化（硝化反応）が進行する。好気槽内の下水と活性汚泥との混合液は循環ラインを

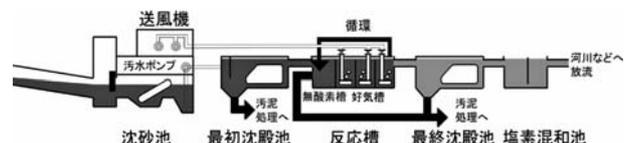


Fig. 2 The schematic diagram of a sewage treatment plant

通じて無酸素槽に返送される。無酸素槽では曝気が無いいため分子状酸素がほとんどなく、微生物の呼吸に硝酸の結合酸素が使用される。すなわち、硝酸が窒素ガスへと還元される脱窒反応が進行し、水中から窒素が除去される。

好気槽で溶存酸素 (DO) が不足すると有機物除去や硝化が十分に進まず処理水質が悪化するため、DOを必要分量に維持する工夫が必要である。このひとつとして DO 一定制御が古くから使用されている。DO 一定制御では、好気槽槽末端の DO を一定値に保つよう、曝気量が自動で制御される。好気槽内の活性汚泥に十分な酸素を供給することができるという利点がある一方、曝気量が過剰になりやすく、消費電力の増大が課題であった。さらに、処理水質を直接の制御対象としないため、均一な処理水質を得ることが困難であった。

近年では、計測技術の発達により、反応槽内のアンモニア態窒素濃度を常時測定できる計器 (アンモニア計) が実用化され始めた。これをきっかけとして、アンモニア計を活用した新たな曝気量制御技術の開発が進められている。本報では、当社技術を事例に、計測技術の発達により生まれた新たな曝気量制御技術について紹介する。

2. アンモニア制御

2.1 アンモニア制御の概要

近年、豊かな水産資源確保などを目的に、下水処理場周辺水域の能動的な栄養塩管理の機運が高まっている。下水に含まれる窒素、りんは水質汚濁の一因となりうる一方、海藻などの水産資源の栄養源でもある。能動的な管理とは水質汚濁を生じさせない範囲で下水処理水の質を調整して周辺水域の栄養塩濃度を人為的に増減させる取り組みである。曝気量削減による省エネのほか、このような処理水質を調整するというニーズにも対応しうる技術としてアンモニア制御が考えられる。アンモニア制御とは、アンモニア計により計測し

た好気槽内のアンモニア態窒素濃度が目標値に対して一定になるよう曝気量を制御する技術であり、当社では好気槽の上流側と末端の2か所で計測したアンモニア態窒素濃度に基づいて、好気槽へ供給する曝気量を演算するアンモニア制御アルゴリズムを開発した²⁾。

Fig. 3 に当社が開発したアンモニア制御の概略図を示す。好気槽末端のアンモニア態窒素濃度の計測値によるフィードバック (FB) 制御に加えて、好気槽上流側のアンモニア態窒素濃度の予測値によるフィードフォワード制御 (FF) を組み合わせるとともに、複数設置された風量調節弁を個別に制御することで最適な曝気量制御を行う。具体的には、式(1)により曝気量を制御する。

$$Q_{\text{air}} = K_{a,i} \times NH_{4,in} \times Q_{in} + K_{p,i} \times (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) + K_{i,i} \times \sum (NH_{4,eff} - NH_{4,target}) \quad (1)$$

ここで、 Q_{air} は曝気量、 $NH_{4,in}$ は流入アンモニア態窒素濃度、 Q_{in} は流入水量、 $NH_{4,eff}$ は好気槽末端アンモニア態窒素濃度、 $NH_{4,target}$ は好気槽末端での目標アンモニア態窒素濃度、 $K_{a,i}$ 、 $K_{p,i}$ 、 $K_{i,i}$ は i 番目の回路における定数である。制御の定数 ($K_{a,i}$ 、 $K_{p,i}$ 、 $K_{i,i}$) を回路ごとに重みを付けて配分することにより、好気槽前段の回路では主に流入アンモニア態窒素濃度の変動に応じて曝気量を変動させ、負荷変動に対する追従性を向上させる。一方、後段の回路は好気槽末端アンモニア態窒素濃度による FB 制御を主体とすることで、目標とするアンモニア態窒素濃度に安定的に追従できる制御が可能となる。さらに、 $NH_{4,in}$ は数時間先の予測値を使用することで、FF 制御の効果をさらに高めることができる。

2.2 アンモニア制御のシミュレーション評価

反応槽での生物処理を模擬できる、国際水協会 (IWA) の活性汚泥モデル³⁾を用いて、アンモニア制

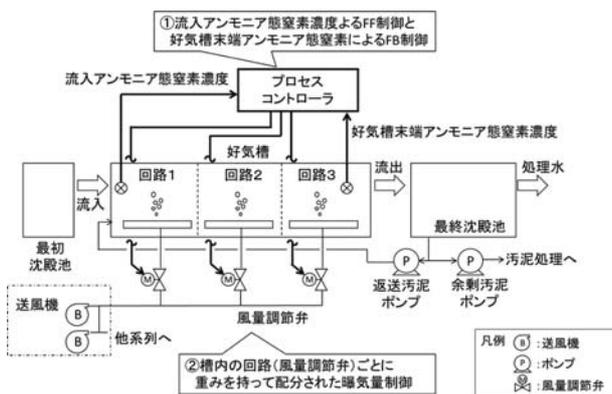


Fig. 3 The schematic diagram of the ammonia-control

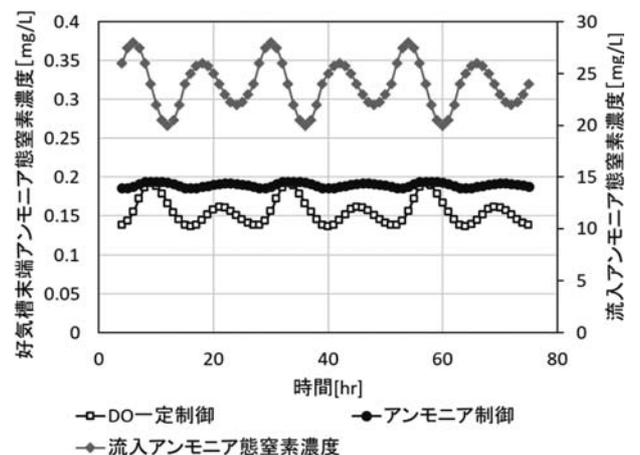


Fig. 4 The simulated ammonia nitrogen concentration at the end of the reactor

御のシミュレーション評価を実施した。仮想的な下水処理場の好気槽（水理的滞留時間 HRT 8.7 hr, 好気槽容積 10,400 m³）をシミュレータ上で構築し、下水処理場にて一般的に見られる変動パターンを模擬した流入アンモニア態窒素濃度の時間変動に対して、アンモニア制御と DO 一定制御を適用した際の好気槽末端アンモニア態窒素濃度の挙動をシミュレーションした。**Fig. 4** に好気槽末端アンモニア態窒素濃度のシミュレーション結果を示す。なお、参考として流入アンモニア態窒素濃度の変動も図中に示す。また、アンモニア制御における好気槽末端での目標アンモニア態窒素濃度は、DO 一定制御での好気槽末端アンモニア態窒素濃度の最大値と等しい値を設定した。高度処理を実施する下水処理場では、好気槽末端アンモニア態窒素濃度は 1 mg/L 以下まで処理されることが多いが、今回のシミュレーションでも DO 一定制御、アンモニア制御共に好気槽末端アンモニア態窒素濃度は 1 mg/L まで低減された。ここで、DO 一定制御では反応槽末端アンモニア態窒素濃度が 0.14~0.2 mg/L で変動したのに対し、アンモニア制御では 0.18~0.2 mg/L の範囲で制御された。アンモニア制御では処理対象であるアンモニア態窒素を直接測定し、目標値に制御するため、好気槽末端アンモニア態窒素濃度の変動が抑えられ、目標値に追従した制御が可能であることが示唆された⁴⁾。

以上のように、下水処理プロセスの処理対象となるアンモニア態窒素濃度を直接測定し、その値に基づいて曝気量を制御することで、処理水質の精緻な制御が可能となる。

3. AI を活用した制御の更なる高度化

3.1 曝気量制御への AI の活用

アンモニア制御において、好気槽末端での目標アンモニア態窒素濃度は人の判断により設定される。具体的には、各下水処理場の運転管理担当者が、適切な処理水質を得るために必要な濃度を選定する。

一方、近年の AI の目覚ましい発展により、人の判断を介さずに多種・多量のデータを学習した AI がプロセス全体を最適化するよう自動制御を行う事例が増えている。アンモニア制御においても、AI を活用して制御目標値を自動で最適化することにより、従来にない効果が得られた事例を紹介する。

3.2 窒素除去を促進する曝気量制御技術

国内にある下水処理場のデータを解析した結果、窒素除去量と、好気槽出口（好気槽で処理された水が槽外へ流出した地点）で計測したアンモニア態窒素濃度に関して興味深い知見が得られた。**Fig. 5** に実際の下

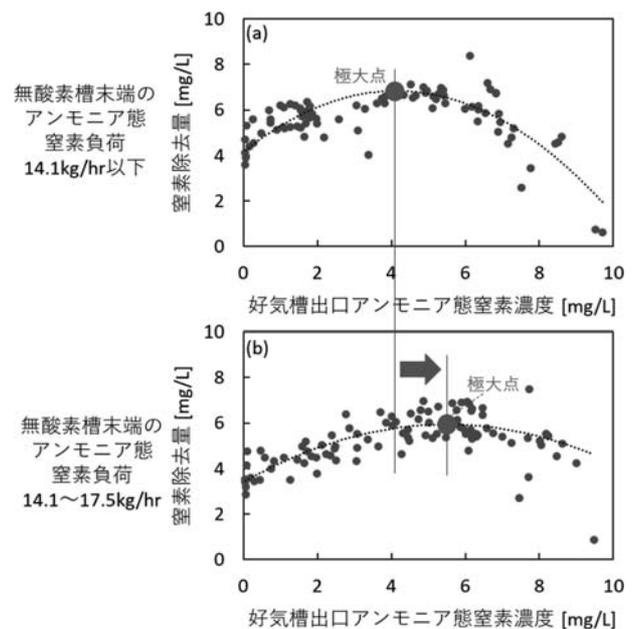


Fig. 5 The relationship between the nitrogen removal amount and the ammonia nitrogen concentration at the end of the reactor

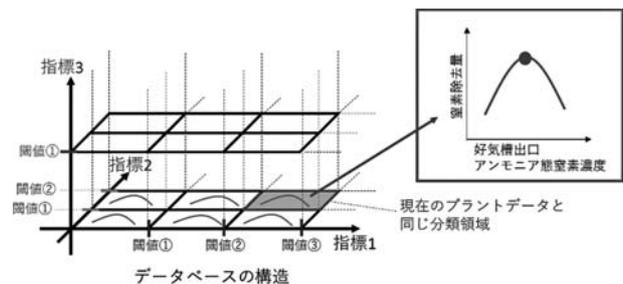


Fig. 6 The schematic diagram of the automatic control target value setting function

水処理場にて取得した窒素除去量と好気槽出口アンモニア態窒素濃度の関係を示す。**Fig. 5** より、好気槽出口アンモニア態窒素濃度が 4 mg/L 付近で窒素除去量の極大点が見られることがわかった。さらに、流入負荷の指標として計測した無酸素槽末端のアンモニア態窒素負荷に基づいてデータを分類したところ、アンモニア態窒素負荷が大きいほど、窒素除去量の極大点に変化した。以上より、好気槽出口アンモニア態窒素濃度を指標として窒素除去が最も促進される運転条件を把握できることができ、さらにその値は流入負荷によって変動することが示唆された。

以上の知見を踏まえ、窒素除去が促進されるように好気槽出口アンモニア態窒素濃度の目標値を AI が自動で設定する制御目標値自動設定機能を構築した。**Fig. 6** に制御目標値自動設定機能の概略図を示す。本機能は、過去の流入負荷等の運転データを基にクラスタリングを行い、現在の運転状況に最も近いクラスタに属するデータを用いて、**Fig. 5** に示したような窒素除去量と好気槽出口アンモニア態窒素濃度の関係を得る。その後、この関係に基づいてデータセットから目

標とする窒素除去量を達成可能な好気槽出口アンモニア態窒素濃度を算出する。

制御目標値自動設定機能により算出された反応槽出口アンモニア態窒素濃度は、上記アンモニア制御の目標値として入力され、曝気量が制御される。

3.3 窒素除去を促進する曝気量制御技術の実証試験

上記の制御システムを実際の下水处理場に実装し、実証試験を実施した。Fig. 7に実証試験を実施した機場の構成図を示す。本機場は窒素とりんの除去が可能な嫌気-無酸素-好気 (A₂O) 法が採用されている。多くの下水処理場で既に設置されている DO 計、MLSS (活性汚泥浮遊物) 計に加えて、曝気が供給される好気槽への流入負荷を計測するため、前段の無酸素槽末端にアンモニア計と NADH (還元型ニコチンアミドアデニンジヌクレオチド) 計を追加で設置した。さらに、好気槽出口にもアンモニア計を設置することでアンモニア制御を実施できる構成とした。ここで、NADH とは活性汚泥微生物の代謝過程で生じる物質であり、流入水中の有機物量と相関がある指標である^{5,6)}。

実証試験は夏季と冬季を含む 2022 年 5 月～2023 年 2 月までの約 10 か月の間実施し、曝気量の削減効果と処理水全窒素の低減効果を検証した。

Fig. 8 に実証試験における実証系の好気槽出口アンモニア態窒素濃度、実証系と比較系の曝気量、処理水全窒素について、一部抜粋した期間の推移を示す。なお、比較系では、実証系と同一の処理方式、処理水量にて、従来の DO 一定制御による曝気量制御が実施された。実証系の好気槽出口アンモニア態窒素濃度は

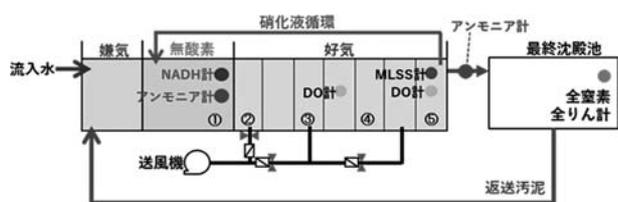


Fig. 7 The configuration of the demonstration experiment site

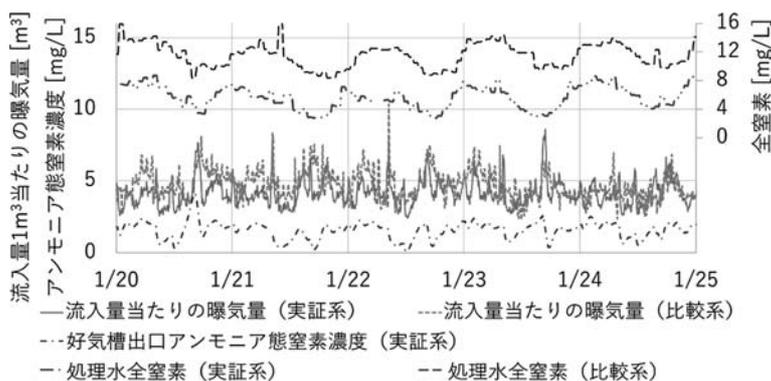


Fig. 8 The results of the demonstration experiment

Table 1 The reduction rates of the aeration and the total nitrogen in treated water

	曝気量削減率 [%]	処理水全窒素低減率 [%]	平均水温 [°C]
5 月	16.8	33.1	22.3
6 月	16.7	29.4	23.3
7 月	19.8	43.5	25.3
8 月	20.8	46.0	26.1
9 月	16.7	30.4	25.6
10 月	16.3	37.9	23.8
11 月	20.2	30.2	22.6
12 月	3.6	19.9	20.6
1 月	8.0	33.5	19.7
2 月	6.6	28.0	19.2
全体	15.2	34.7	23.2

おおむね 0.5～2 mg/L の間で推移し、好気タンクでの完全硝化を抑制した運転が実施された。これにより、実証系の曝気量は比較系と比べて低い値で推移した。なお、比較系の好気槽出口アンモニア態窒素濃度は実証試験期間全体を通して 0.2 mg/L 以下であった。実証系では比較系と比べて処理水全窒素の低減が確認された。Table 1 に実証試験期間における曝気量削減率と処理水全窒素低減率を示す。約 10 か月の連続試験で曝気量は平均で 15.2% 削減され、処理水全窒素は平均で 34.7% 低減された。以上より、従来はトレードオフの関係にあると言われていた処理水質と消費電力について、実証制御により両者の改善を両立できることが見込まれた⁷⁾。

4. おわりに

反応槽内の水質をリアルタイムに計測する技術を活用した曝気量制御技術として、アンモニア制御、及び窒素除去を促進する曝気量制御技術について紹介した。これらの技術は下水処理プロセスにおける処理水質の向上や、省エネルギー化への貢献が期待される。さらに今回紹介した技術では、過去実績値を基に AI が自律的に制御目標値を算出し、窒素除去が促進されるように曝気量が制御された。下水処理場では運転・維持

管理に多岐にわたるノウハウが必要な一方、人口減少のためベテラン職員の確保と技術継承が課題とされている。この課題解決において AI による暗黙知の形式化は重要な役割を果たすと考えられるが、同時に AI への入力情報を取得するための計測技術の発達も不可欠である。国土の基盤たる下水処理インフラの将来にわたる安定運用に向け、計測技術およびこれを活用した新たな制御技術の継続的な開発が求められている。

参考文献

- 1) 日本下水道協会：平成 29 年度版下水道統計，日本下水道協会（2019）
- 2) 吉田 航，今村英二，野田清治，木本 勲，橋爪弘二：下水処理プロセスの曝気量制御技術，三菱電機技報，Vol. 94, No. 7, pp. 45-49（2020）
- 3) 味埜 俊：活性汚泥モデル ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3，環境新聞社（2005）
- 4) 橋爪弘二，吉田 航，今村英二，野田清治，古川誠司：流入・流出水質データを活用した下水処理場向け曝気風量制御，三菱電機技報，Vol. 93, No. 7, pp. 19-22（2019）
- 5) 林 達也，松浦申浩，森田健史，塩見 浩：NADH 計の開発と水処理施設での実証試験，第 55 回下水道研究発表会，pp. 977-979（2019）
- 6) 葛西孝司，池田広数：水質改善と省エネルギーの両立を目指した風量制御技術の開発，東京都下水道局技術調査年報，Vol. 43, pp. 220-228（2019）
- 7) 植田怜央，吉田航，林佳史，今村英二，木本 勲，霜田健太：窒素除去と省エネを両立する曝気量制御技術の開発，環境システム計測制御学会誌，Vol. 28, No. 2/3, pp. 65-69（2023）